

# Oxidické vrstvy a bifilmy v odliatkoch hliníkových zliatin

**Marek Galčík, Ing.\***

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: marek.galcik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

**Marek Brúna, doc. Ing., PhD.**

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,  
Žilinská univerzita v Žiline,  
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.  
E-mail: marek.bruna@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2756

## Oxide layers and bifilms in aluminium alloy castings

**Abstract:** Surface of aluminium alloy melt is covered by an oxide layer when it is in contact with the surrounding atmosphere. When the oxide layer is retained on the surface of the melt it prevents the melt by hydrogen saturation. The oxide layer is harmful when it is submerged into the melt. The work focuses on the influence of the melt velocity on the bifilm formation, morphology of oxide layers and their influence on the porosity and filling the mold cavity.

**Keywords:** oxide layer, bifilm, aluminium alloy casting

## ÚVOD

Kvalita použitého vstupného materiálu ako aj kvalita pripravenej taveniny významne vplýva na kvalitu odliatkov. Tesne pred odlietavím sa musí pripravená tavenina skontrolovať a v prípade potreby upraviť tak, aby spĺňala aspoň minimálne požiadavky na jej kvalitu a malo by sa z nej odstrániť čo najviac nečistôt. S cieľom minimalizovať množstvo vnútorných chýb v odliatkoch, je potrebné pripraviť vysokokvalitný tekutý kov. Za vysokokvalitný tekutý kov sa považuje kov, ktorý neobsahuje nečistoty. Predovšetkým ide o dvojité oxidické vrstvy, ako aj o prvky roztvárajúce tieto vrstvy. V zliatinách hliníka sú takýmito prvkami železo, vodík a iné plyny. Východiskom na dosiahnutie čistej a kvalitnej taveniny je kvalita vstupného materiálu, z ktorého sa tavenina pripravuje. Keďže sa na tavenie používa kombinácia primárnych zlievarenských zliatin a sekundárnych zlievarenských zliatin vyrobených pretavením materiálu, treba dbať na zvýšenie obsahu železa v tavenine, čo vedie k zvýšenému množstvu škodlivých intermetalických fáz. Z výskumov posledných rokov vyplýva, že prítomnosť reoxidačných procesov a tvorba dvojitých oxidických vrstiev sa považuje za kľúčový problém ovplyvňujúci konečnú kvalitu odliatkov z hliníkových zliatin. Preto je dôležité pochopiť príčiny a mechanizmy ich vzniku, čo umožní eliminovať ich určité množstvo

počas procesu odlietavania pomocou vhodného technologického riešenia [1-3].

## 1 VPLYV RÝCHLOSTI TAVENINY NA VZNIK DVOJITÝCH OXIDICKÝCH VRSTIEV

Rýchlosť prúdenia taveniny patrí medzi najdôležitejšie parametre počas plnenia vtokovej sústavy, ktoré vplývajú na výslednú kvalitu odliatku. Čelo prúdu taveniny nesmie mať príliš veľkú rýchlosť. Kritická rýchlosť čela prúdu pre väčšinu kovov používaných v strojárskom priemysle (ako oceľ, Mg, Cu, Zn, Al a Ni zliatiny) je v rozsahu 0,4 až 0,6 m·s<sup>-1</sup> (tab. 1). Výskumy ukázali, že pre každý tekutý kov existuje jeho kritická rýchlosť, nad ktorou bude dochádzať na povrchu taveniny k turbulenciám, čoho výsledkom bude prekladanie oxidických vrstiev na seba a ich následné strhávanie do objemu taveniny. Pre výpočet kritickej rýchlosti možno použiť vzťah 1 [3]:

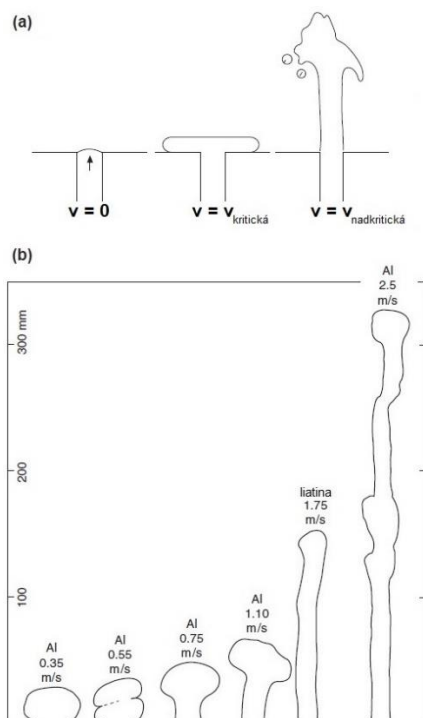
$$v_{krit} \approx 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{\gamma \cdot g}{\rho}} \approx 3,54 \cdot \sqrt[4]{\frac{\gamma}{\rho}}, \quad (1)$$

kde  $\gamma$  je povrchové napätie [N·m<sup>-1</sup>],  
 $g$  je gravitačné zrýchlenie [m·s<sup>-2</sup>],  
 $\rho$  je hustota taveniny [kg·m<sup>-3</sup>] [3].

Hodnota rýchlosti  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pre taveninu hliníkovej zliatiny sa považuje za kritickú rýchlosť, čo bolo dokázané experimentálne Runyorom a kol. v roku 1992, kedy pozorovali rýchlosť taveniny hliníkovej zliatiny vystupujúcu zo zárezu. Už pri rýchlosti  $0,55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  kov vstupujúci do dutiny formy vystrekol do malej výšky, padal a vytvoril prvý záhyb. Vyššie rýchlosti taveniny dosahovali veľkej výšky rozstreku (obr. 1), čo viedlo k pádu taveniny z tejto výšky a následnému prekladaniu a strhávaniu veľkého množstva oxidických vrstiev do objemu taveniny [2, 4, 5].

Tab. 1. Kritické rýchlosti niektorých tekutých kovov [2]

Tavenina	Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	Povrchové napätie [ $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Kritická rýchlosť [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]
Ti	4110	1.65	0,5
Al	2385	0.914	0,5
Mg	1590	0.559	0,42
Fe	7015	1.872	0,45
Ni	7905	1.778	0,43
Cu	8000	1.285	0,4
Zn	6575	0.782	0,37



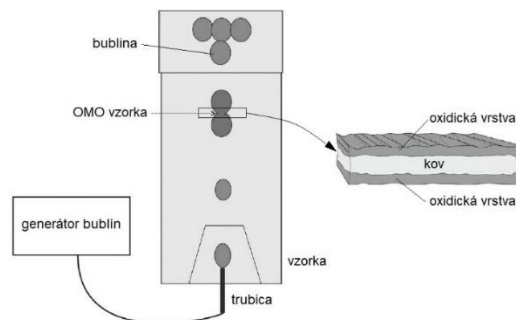
Obr. 1. Rýchlosť taveniny vstupujúcej do dutiny formy: a) pri nulovej, kritickej a nadkritickej rýchlosti, b) experimentálne pozorovanie taveniny vstupujúcej do dutiny formy rôznymi rýchlosťami [2]

Ak sa predpokladá kritická rýchlosť  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , tak výška odlievania taveniny, pri ktorej tavenina dosiahne kritickú rýchlosť je 12,7 mm. Vystupujúca tavenina cez zárez s hodnotou rýchlosti menšou ako  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  naplní dutinu formy pokojne bez prekladania

povrchových oxidických vrstiev. Tieto turbulencie by sa nemali zamieňať s objemovými turbulenciami, pretože pri väčšine metód odlievania sa dosahuje *Reynoldsove číslo* omnoho väčšie ako 2000, aj keď nedôjde k rozbitiu povrchu turbulentným prúdením [3].

## 2 MORFOLÓGIA OXIDICKÝCH VRSTIEV

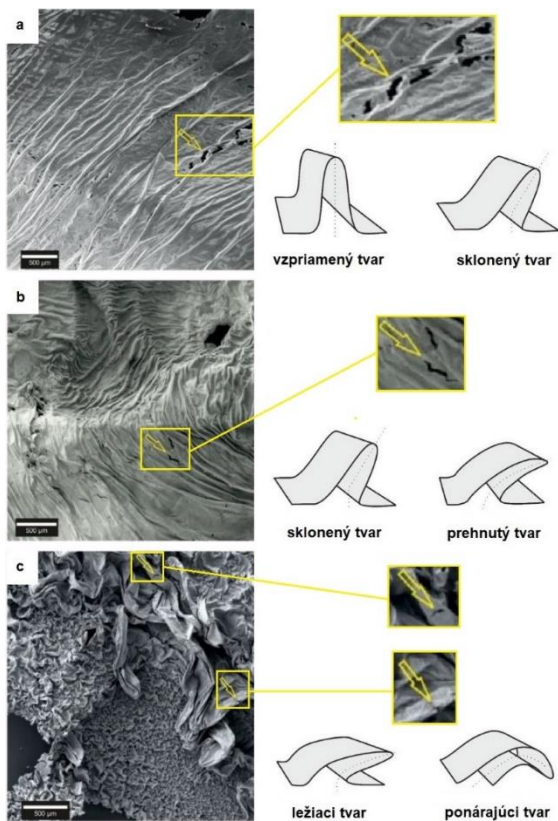
Povrch oxidickej vrstvy obsahuje množstvo záhybov, ktoré sú charakteristickým morfológickým znakom prítomnosti oxidickej vrstvy. Spôsob prekladania vrstiev bol pozorovaný v závislosti od chemického zloženia na zliatine horčíka s hliníkom pomocou techniky založenej na uvoľňovaní umelých bublín do roztaveného kovu, ktorá bola navrhnutá Divandrim a Campbellom. Zrážkou a uviaznutím uvoľnených bublín v dutine formy sa vytvorí vrstva medzi dvoma susednými bublinami, ktorá sa nazýva *oxid/kov/oxid* sendvičová vrstva, resp. sendvičová *OMO* (*oxide/metal/oxide*) vrstva. Podľa toho sa táto metóda nazýva *OMO* sendvičová metóda, ktorej princíp je znázornený na obr. 2. Vzhľadom na obmedzené množstvo kyslíka v bublinách sa oxidické vrstvy tvorené okolo nich považujú za mladé oxidy. Sendvičová metóda poskytuje jedinečné informácie o dynamicky sa formujúcich oxidických vrstvách. Pomocou tejto metódy sa dajú získať informácie o morfológii, hrúbke a zložení týchto oxidických vrstiev [6-8].



Obr. 2. *OMO* sendvičová metóda [7, 8]

Bolo pozorované, že povrchy oxidických vrstiev obsahujú veľké množstvo záhybov. Obrázok 3 schematicky zobrazuje rôzne typy záhybov v závislosti od chemického zloženia. Morfológia povrchu oxidických vrstiev bola pozorovaná na vzorkách čistého horčíka a na zliatinách horčíka s 3 hm. % a 6 hm. % hliníka. Oxidická vrstva čistého horčíka sa prekladá hlavne vo vzpriamenom a sklonenom tvare (obr. 3a), zliatina horčíka s 3 hm. % Al má tvar záhybov v sklonenom tvare, v niektorých oblastiach v prehnutom tvare (obr. 3b). V zliatine Mg so 6 hm. % hliníka bol zaznamenaný ležiaci až ponárajúci sa tvar záhybov oxidickej vrstvy (obr. 3c) a počet záhybov a ich veľkosť je väčšia ako u čistého horčíka. Z pozorovaní vyplýva, že prídavok hliníka významne mení morfológiu oxidických vrstiev, kedy so zvyšujúcim sa jeho obsahom dochádza k väčšiemu

zvrásneniu vrstiev. To autori príspevku pripisujú tomu, že prídavok *Al* znižuje tuhosť oxidickej vrstvy a preto sa dá ľahšie poskladať. Na vzorkách je možné pozorovať aj trhliny, ktoré sú naznačené žltými šípkami. Počas tuhnutia kov uzavretý medzi dvoma vrstvami oxidu sa zmršťuje, čo spôsobuje ťahové napätia. Keďže pevnosť v ťahu oxidickej vrstvy je nižšia ako základného kovu, dochádza k trhaniu oxidickej vrstvy v oblastiach, kde kov nie je zachytený alebo v oblastiach, kde je množstvo zachyteného kovu nízke. Vo vzorkách *Mg* zliatiny so 6 hm. % hliníka sa trhliny spôsobené zmršťovaním vyskytujú zriedka. To možno pripísať zväčšeniu pevnosti a odolnosti voči trhaniu oxidickej vrstvy účinkom prídavku hliníka [7, 9, 10].

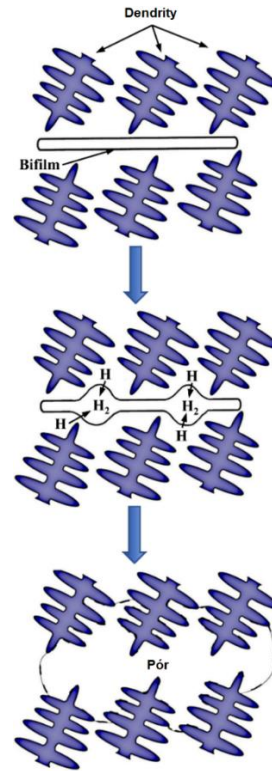


Obr. 3. Skladanie oxidických vrstiev: a) čistý *Mg*, b) *Mg* + 3 hm. % *Al*, c) *Mg* + 6 hm. % *Al* [7]

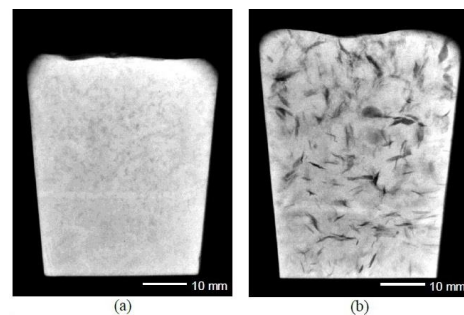
### 3 VPLYV DVOJITÝCH OXIDICKÝCH VRSTVIEV NA PÓROVITOSŤ

Pórovitosť je jednou z najbežnejších chýb v odliatkoch, ktorá môže viesť k zníženiu mechanických vlastností. V prípade zliatin hliníka sa tvorba pórov asociuje najmä s zmršťovaním pri tuhnutí a znižovaním rozpustnosti vodíka počas tuhnutia s klesajúcou teplotou. Výskumy posledných rokov však ukazujú, že dvojité oxidické vrstvy fungujú ako iniciátori pórovitosti, zatiaľ čo vodík len prispieva k tvorbe pórov, pričom v minulosti sa za hlavného činiteľa pórovitosti a iných chýb v odliatkoch považoval práve vodík. Vodík nachádzajúci sa v odliatku pri tuhnutí nad úroveň jeho

rozpustnosti difunduje medzi vrstvy bifilmu, čím dochádza k rozšíreniu pórov ako je znázornené na obr. 4. Ak počas procesu plnenia dutiny formy vzniká viac bifilmov, tak sa dá očakávať aj väčšie množstvo pórov v stuhnutom odliatku, čo výrazne znižuje jeho kvalitu. Použitie vákuua počas tuhnutia pomáha pórům sa rozširovať ešte viac, ako je vidieť na röntgenových snímkach ukazujúcich vznik pórov pri zníženom tlaku (obr. 5) [4, 11-13].



Obr. 4. Schematické znázornenie vzniku póru iniciovaného bifilmom [14]



Obr. 5. Röntgenové snímky vzoriek: a) tlak 1 atm., b) 0,1 atm. [15]

### 4 VPLYV OXIDICKEJ VRSTVY NA PLNENIE DUTINY FORMY

Prítomnosť oxidickej vrstvy má vplyv nielen pri tuhnutí odliatku, ale aj v priebehu plnenia dutiny formy. Jej prítomnosť zásadným spôsobom zhoršuje schopnosť vyplňania dutiny formy, najmä do úzkych oblastí a malých otvorov. Účinkom povrchového napätia je tavenina zadržovaná pri vstupe do užších častí. *Meniskus* (zakrivenie hladiny taveniny v dôsledku interakcie so stenou formy) vytvára

hrubnúcu oxidickú vrstvu, ktorá pôsobí ako bariéra pre ďalší posun taveniny. Po zaplnení rozvádzacieho kanála vytvorí tavenina tlak na zosilnenú oxidickú vrstvu, ktorý je potrebný pre jej pretrhnutie a pre ďalší pohyb tekutého kovu. Pohybom taveniny sa na jej čele neustále vytvára nový povrch a starý (s oxidmi) je prtláčaný na steny formy vplyvom trenia [2].

Pri odliatkoch, pri ktorých môže dôjsť k pomalému plneniu dutiny formy, môžu byť pozorované chyby typu zavalenina. Predpokladá sa, že zavalenina môže byť spôsobená tým, že sa horná vrstva taveniny valí po vodorovnom, zoxidovanom povrchu, čím vytvára rozsiahlu horizontálnu oxidickú vrstvu. Väčšina experimentálnych prác tento jav nepotvrďuje. Možno predpokladať, že valivá vlna môže vznikáť iba pri podmienkach kedy má povrch dostatočnú pevnosť (v dôsledku tuhnutia) pre udržanie jej hmotnosti. Hoci Loper a Newby (1994) vo svojom výskume tvrdia, že tento jav je pozorovateľný, ich práca však nie je jednoznačná a potvrdená, a je možné že došlo k pozorovaniu rozpínajúcej sa vlny [2].

Približovaním zakriveného čela prúdu taveniny ku vrchu formy sa plnenie spomaľuje a nastáva nekontinuálny priebeh plnenia. Tento jav bol pozorovaný Evansom v roku 1997. Čelo taveniny ostáva nehybné a plnenie dutiny formy sa uskutočňovalo horizontálne, do strán, oddelenými vlnami. Vlna sa šírila po dĺžke čela prúdu taveniny až pokým nedosiahla najvzdialenejší bod. Pri strete so stenou formy sa vlna odrazila späť. Namiesto prerazenia a valenia sa ponad zoxidovaný povrch, vlna prenikla pod oxid a šírila sa oddelením povrchu oxidu. Tento jav vzniká lokálne iba v miestach, kde sa vlna zvyšuje. Na iných miestach pred a za čelom vlny bol povrch zachytený oxidickou vrstvou a nemohol postupovať vertikálne. Rozpínajúce vlny spôsobujú kontúry na povrchu odliatku, ktoré indikujú výšku meniskusu taveniny priebežne počas plnenia formy [2].

## ZÁVER

Práca zhrňa teoretické poznatky o vplyve rýchlosti taveniny na vznik bifilmov, morfológiu oxidických vrstiev a vplyve bifilmov na pórovitosť a plnenie dutiny formy.

## Pod'akovanie

Tento článok bol podporený Grantovým systémom UNIZA 01/2022 (17375) a vznikol v rámci projektu KEGA: 022ŽU-4/2021.

## LITERATÚRA

[1] BRŮNA, M. - BOLIBRUCHOVÁ, D. - PASTIRČÁK, R. (2017): *Analýza reoxidačných procesov vo vtokovej sústave pri odliavaní Al zliatin*. In: Slévárnství, s. 300-303, ISSN 0037-6825.

[2] CAMPBELL, J. (2015): *Complete Casting Handbook 2<sup>nd</sup> edition*. Oxford: Elsevier Ltd. 1054 pp. ISBN 978-0-444-63509-9.

[3] JOLLY, M. (2005): *Prof. John Campbell's Ten Rules for Making Reliable Castings*. Oxford: Elsevier Ltd. 2015. pp. 1054. ISBN 978-0-444-63509-9.

[4] DISPINAR, D. - CAMPBELL, J. (2004): *Metal Quality in Secondary Remelting of Aluminium*. In: Foundry Trade J. Vol. 178. pp. 78-81.

[5] CAMPBELL, J. (2004): *Castings Practice, the 10 Rules of Castings*. 1st ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-7506-4791-5.

[6] PARK, J. M. (2009). *Behaviours of Bifilms in A356 Alloy during Solidification: Developing Observation Techniques with 3-D Micro X-ray Tomography*. Ph.D. Thesis, University of Birmingham, UK, 2009. p. 98.

[7] JALILVAND, M. M. et al. (2021): *Surface oxidation study of molten Mg-Al alloys by oxide/metal/oxide sandwich method*. In: Journal of Magnesium and Alloys. ISSN 2213-9567. DOI: 10.1016/j.jma.2020.10.004.

[8] JALILVAND, M. M. et al. (2020): *On the dynamically formed oxide films in molten Mg*. In: Journal of Magnesium and Alloys. Vol. 8, pp. 219-230. ISSN 2213-9567. DOI: 10.1016/j.jma.2019.12.003.

[9] POLMEAR, I. J. (2017): *Light Alloys*. In: Metallurgy of the Light Metals, 5nd Ed, Elsevier Ltd, ISBN: 978-0-08-099431-4.

[10] NOURI, M. et al. (2016): *Thin Solid Films*. pp. 29-37.

[11] GYARMATI, G. et al. (2020): *Investigation on Double Oxide Film Initiated Pore Formation in Aluminum Casting Alloys*. In: International Journal of Engineering and Management Sciences. Vol. 5, pp. 141-153. DOI: 10.21791/IJEMS.2020.2.18.

[12] EL-SAYED, M. A. (2016): *The Behaviour of Bifilm Defects in Cast Al-7Si-Mg Alloy*. In: PLOS ONE. DOI: 10.1371/journal.pone.0160633.

[13] EL-SAYED, M. A. (2019): *Double oxide film defects and the properties of aluminum castings. A review*. In: Global Journal of Material Science & Engineering. Vol. 01, pp. 5-12. DOI: 10.37516/global.j.mater.sci.eng.2019.0053.

[14] GYARMATI, G. (2019): *Characterization of the double oxide film content of liquid aluminum alloys by computed tomography*. In: Materials Characterization, Vol. 157. DOI: 10.1016/j.matchar.2019.109925.

[15] CAMPBELL, J. (2012): *Stop Pouring, Start Casting*. In: International Journal of Metalcasting, Vol. 6, pp. 7-18. DOI: 10.1007/BF03355529.